

*А.С. КУЦЕНКО, д-р. техн. наук, С.В. КОВАЛЕНКО*

## **ПЛАНИРОВАНИЕ РЕМОНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГБЛОКОВ АЭС ПО КРИТЕРИЮ НАДЕЖНОСТИ**

У статті розглядається математична постановка задачі планування оптимальних об'ємів ремонтів енергоблоку АЕС на основі аналізу загальної моделі його експлуатації. Пропонується версія моделі планування об'ємів ремонтів функціонально відособленої системи енергоблоку, орієнтована на застосування в автоматизованій системі управління ремонтами

**Введение.** Самое масштабное применение атомной энергии в мирных целях относится к эксплуатации энергетических блоков АЭС. Основным условием включения энергоблоков АЭС в орбиту хозяйственной деятельности является их безопасность, то есть допустимая обществом доля риска радиационного воздействия на людей и на окружающую среду. В проблеме обеспечения безопасности, можно выделить три необходимых условия, когда электрическая энергия, вырабатываемая блоками АЭС, может быть признана конкурентоспособной, в сравнении с электрической энергией, получаемой в других технологиях [1,2,3].

Первое условие заключается в том, что должно осуществляться государственное регулирование безопасностью по всему комплексу проблем, обеспечивающих ее приемлемый уровень.

Вторым необходимым условием является сознательное согласие общества на использование той электрической энергии, которая вырабатывается на блоках АЭС, поскольку вместе с электрической энергией потребителям поставляется и доля риска от их эксплуатации. В этом отношении уместно вспомнить позицию общества, поспешно созданную средствами массовой информации, когда после аварии на Чернобыльской АЭС были приостановлены работы на Крымской, Хмельницкой, Ровенской АЭС и на Харьковской АТЭЦ. В результате прекращения работ на этих объектах для общества оказались потерянными значительные материальные средства.

Третьим необходимым условием является собственно обеспечение безопасности действующих энергоблоков. Объективным показателем безопасности энергоблока АЭС является вероятность радиационной аварии или риск от его эксплуатации [4,5]. Эти качества энергоблока, а также эффективность его работы в значительной степени формируются путем проведения планово-предупредительных ремонтов (ППР). Стоимость ежегодных ППР может быть недопустимо большой по экономическим причинам, если осуществлять в этот период капитальные ремонты всего оборудования или замены на новое оборудование. Поэтому, в пределах назначенного ресурса энергоблока, который составляет, обычно, 30 лет, естественно возникает и является актуальной задача планирования

оптимальных объемов ремонтов оборудования энергоблоков АЭС, которая к настоящему времени еще не получила должного освещения в научных публикациях. Решение такого рода задач целесообразно осуществлять с помощью автоматизированной системы [6]. Но прежде необходимо обеспечить достаточный уровень формализации задачи.

**Постановка задачи.** Пусть  $N(x, \xi, t)$  – электрическая мощность энергоблока в момент времени  $t$ , а  $x$  и  $\xi$  – векторы технологических (давление, расход, энтальпия теплоносителей) и случайных внутренних параметров (режимы работы, температуры окружающей среды и др.). Допустим также, что в момент времени  $t_0$ , относящийся к периоду ППР, осуществляется мгновенное восстановление надежности (ремонт) энергоблока до такого уровня, который обеспечивает его работоспособность энергоблока до заданного момента времени  $t$ . Требуется найти такие объемы ремонтов оборудования энергоблока в момент времени,  $t_0$  чтобы:

1) за время  $\Delta t = t - t_0$  было выработано максимальное количество электрической энергии  $E$ :

$$E(t_0, t) = \int_{t_0}^t N(x, \xi, t) dt \rightarrow \max; \quad (1)$$

2) вероятность радиационной аварии (безопасность) на энергоблоке не превосходила заданной величины  $P^*(A)$ :

$$P(A, x, \xi) \leq P^*(A); \quad (2)$$

3) ресурс  $r_j$  каждой  $j$  единицы оборудования  $e_j$  в результате ремонта в момент времени  $t_0$  и в будущие моменты времени ремонтов оказался не меньше его назначенного ресурса  $r_j^*$ :

$$r_j(x, \xi) \leq r_j^*, \quad j = \overline{1, N}; \quad (3)$$

4) суммарные затраты на ремонтные работы в момент времени  $t_0$  не превышали заданной величины  $Z^*$ :

$$\sum_{j=1}^N z(e_j) \leq Z^*. \quad (4)$$

Выражения (1) – (4) дают математическое описание стратегии ремонта энергоблока в момент времени  $t_0$  в самом общем виде. В таком виде задача планирования ремонтов представляет собой многопараметрическую задачу оптимизации достаточно большой сложности. Эта сложность обусловлена размерностью задачи, потребностью в огромном числе данных, сложностью процедур вычисления выработки электроэнергии и вероятностей аварий, сложностью вычисления ресурсов оборудования.

В тоже время в такой общей многопараметрической задаче только часть параметров определяет объемы ремонтов оборудования. Рассматривая работу

энергблока на номинальном режиме (доминирующий режим работы энергблоков АЭС), введем предположения, которые позволят упростить задачу.

Предположение 1. Управление технологическими параметрами  $x$  осуществляется в соответствии с требованиями Регламента и так, что при любых случайных параметрах  $\xi$  и на любом периоде эксплуатации  $\Delta t$  обеспечивается максимально возможная выработка энергии. То есть предполагается, что условие (1) выполняется всегда. Поэтому условие (1) можно исключить из исходной задачи.

Предположение 2. Выполнение требований безопасности (2) обеспечивается в проектных условиях эксплуатации энергблока при любых значениях технологических и случайных параметров  $x$  и  $\xi$ . Это предположение отражает очень жесткие требования к действиям людей, к надежности оборудования и систем. Поскольку требования безопасности должны быть удовлетворены при любых  $x$  и  $\xi$ , то тогда  $x$  и  $\xi$  можно исключить из (2), что приводит в сравнении с (2) к более простому условию:

$$P(A) \leq P^*(A), \quad (5)$$

где  $P(A)$  - вероятность радиационной аварии  $A$ , обусловленная только отказами оборудования и систем.

Предположение 3. Ресурс оборудования не зависит от того, при каких значениях технологических параметров  $x$  оно эксплуатируется в рамках Регламента и в пределах назначенного ресурса, и не зависит от случайных воздействий  $\xi$  на его конструкцию. Это предположение позволяет исключить выражение (3) из модели планирования ремонтов.

**Формализация задачи планирования оптимальных объемов ремонтных работ.** Таким образом, если согласиться с введенными предположениями, которые, в основном, отражают практику эксплуатации энергблоков, то задача (1) – (4) существенно упрощается. Однако и в таком упрощенном виде она еще будет мало пригодна для решения задач планирования ремонтов, поскольку ограничения (5) не содержат параметров, определяющих объемы ремонтов. Кроме того, удовлетворение условия (5) весьма трудная и громоздкая задача [2,4,5]. Однако, если энергблок декомпозирован на не пересекающиеся системы  $S_1, S_2, \dots, S_N$ , и для вычисления вероятности аварии на энергблоке построено «дерево» событий [2,5], то условие (5) можно свести к более простым соотношениям.

Вероятность любой  $m$  частной аварии  $P(A_m)$  определяется произведением вероятности  $P(X_m)$  исходного события (вероятности отказа оборудования, принадлежащего системе  $S_m$ ) на вероятности  $Q(S_{m_1}), Q(S_{m_2}), \dots, Q(S_{m_k})$  отказов систем  $S_{m_1}, S_{m_2}, \dots, S_{m_k}$ , образующих путь развития этой аварии [2,5]:

$$P(A_m) = P(X_m)Q(S_{m_1})Q(S_{m_2}) \cdot \dots \cdot Q(S_{m_k}). \quad (6)$$

В силу вышеприведенного допущения о существовании «дерева» событий, предельно-допустимое значение вероятности аварии  $P^*(A)$  может быть представлено в виде суммы предельно-допустимых частных аварий:

$$P^*(A) = P^*(X_m)Q^*(S_{m_1})Q^*(S_{m_2}) \cdot \dots \cdot Q^*(S_{m_k}) + \dots \quad (7)$$

Разложение  $P^*(A)$  на сумму предельно-допустимых частных аварий не единственно. Выбирая любое одно реалистичное в практическом отношении разложение, и сравнивая (6) с (7), получим набор соотношений:

$$P(X_m) \leq P^*(X_m), Q(S_{m_1}) \leq Q^*(S_{m_1}), \dots, Q(S_{m_k}) \leq Q^*(S_{m_k}), \dots \quad (8)$$

Таким образом, сложное условие (5) переводится в совокупность более простых соотношений, связанных только с надежностью отдельных систем  $S_1, S_2, \dots, S_N$ , а не с вероятностью радиационной аварии на энергоблоке. В данной статье рассматривается постановка задачи планирования ремонтов только одной системы из  $S_1, S_2, \dots, S_N$ . Выберем из (8) одно из неравенств в виде  $R_S(t_0, t) \geq R^*$ , где  $R_S(t_0, t)$  – вероятность безотказной работы (ВБР) системы  $S$ , как представителя систем  $S_1, S_2, \dots, S_N$ , а  $R^*$  – предельно-допустимое значение ВБР этой системы. Пусть система  $S$  состоит из  $n$  элементов  $e_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ . ВБР элемента  $e_k$  за время эксплуатации, предшествующее времени  $t_0$ , обозначим  $R_k(t_0)$ .

ВБР  $R_S(t_0, t)$  системы  $S$  за время от  $t_0$  до  $t$  зависит от ВБР ее элементов. ВБР элементов за время от  $t_0$  до  $t$ , в свою очередь, зависит от затрат  $c_k$  на их ремонт в момент времени  $t_0$ , что обуславливает изменение  $R_k(t_0)$ , и от значений показателей надежностей элементов. Изменение  $R_k(t_0)$  вызывается объемами ремонтов элемента  $e_k$ , которые при установленной технологии ремонта можно количественно характеризовать затратами  $c_k$  на ремонт. Определим связь между величиной повышения ВБР  $R_k(t_0)$  элемента  $e_k$  в момент времени  $t_0$  и произведенными затратами  $c_k$  на его ремонт. Для этого введем понятие удельной ВБР  $\delta R_k(t_0)$  элемента  $e_k$ , как величину повышения ВБР элемента, приходящуюся на одну условную единицу (у.е.) затрат на ремонт этого элемента. В результате ремонта в момент времени  $t_0$ , на который затрачено  $c_k$  у.е. элемент может приобрести ВБР  $R'_k(t_0)$ . Разница между этими ВБР в момент времени  $t_0$ , отнесенная к величине понесенных затрат  $c_k$ , определяет удельную ВБР  $\delta R_k(t_0)$  элемента  $e_k$ :

$$\delta R_k(t_0) = (R'_k(t_0) - R_k(t_0)) / c_k. \quad (9)$$

В формуле (9) величина понесенных затрат  $c_k$  на ремонт элемента  $e_k$  известна. Величина  $R_k(t_0)$  может быть определена по известной длительности работы элемента в предшествующий  $t_0$  период. Величина же  $R'_k(t_0)$  неизвестна. Оценим  $\delta R_k(t_0)$  из следующих соображений. Предположим, что элементу  $e_k$  производится капитальный ремонт с затратами  $z_k$ , что обеспечивает элементу ВБР в  $t_0$ , равную единице. Тогда из (9) получим:

$$\delta \bar{R}_k(t_0) = (1 - R_k(t_0)) / z_k. \quad (10)$$

Величина  $\delta \bar{R}_k(t_0)$  из (10) является константой для элемента  $e_k$  с ВБР  $R_k(t_0)$  и одним из возможных значений величины  $\delta R_k(t_0)$  из (9), относительно которой еще не проведены исследования, устанавливающие ее область значений. Тогда, принимая  $\delta \bar{R}_k(t_0)$  за удельную ВБР элемента  $e_k$ , получим, что при любом  $c_k$  из интервала  $0 \leq c_k \leq z_k$  величина  $\bar{R}_k(t_0) = R_k(t_0) + c_k \delta \bar{R}_k(t_0)$  есть ВБР элемента  $e_k$  в  $t_0$ , приобретенная им в результате ремонта с затратами  $c_k$ . Учтем этот результат при вычисления ВБР системы.

ВБР  $R_S(t_0)$  системы  $S$  можно рассматривать как известную функцию  $\varphi$  от ВБР элементов:  $R_S(t_0) = \varphi(R_1(t_0), R_2(t_0), \dots, R_n(t_0))$ . В результате ремонтов элементов  $e_k$  с соответствующими затратами  $c_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$ , найдем приобретенную ВБР системы в  $t_0$ :

$$\bar{R}_S(t_0) = \varphi(R_1(t_0) + c_1 \delta \bar{R}_1(t_0), R_2(t_0) + c_2 \delta \bar{R}_2(t_0), \dots, R_n(t_0) + c_n \delta \bar{R}_n(t_0)) \quad (11)$$

и с учетом произведенного ремонта найдем ВБР  $\bar{R}_S(t_0, t)$  системы за время от  $t_0$  до  $t$ :

$$\begin{aligned} \bar{R}_S(t_0, t) = & \varphi[(R_1(t_0) + c_1 \delta \bar{R}_1(t_0)) \cdot R_1(t), (R_2(t_0) + c_2 \delta \bar{R}_2(t_0)) \cdot R_2(t), \dots \\ & \dots, (R_n(t_0) + c_n \delta \bar{R}_n(t_0)) R_n(t)] \end{aligned} \quad (12)$$

Из (12) видно, что ВБР  $\bar{R}_S(t_0, t)$  системы в результате ремонта определяется ВБР  $R_k(t_0)$  элементов  $e_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$  в момент времени  $t_0$ , понесенными затратами  $c_k$ , удельными ВБР  $\delta R_k(t_0)$  и кривыми надежностей  $R_k(t)$ . Теперь задачу планирования оптимальных объемов ремонтов можно сформулировать так: требуется найти такое распределение затрат  $c_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$  на ремонт системы, чтобы ВБР системы  $\bar{R}_S(t_0, t)$  и предельно-

допустимое значение ВБР системы  $R^*$  наименее отличались друг от друга за время до  $t$  и сумма затрат на ремонт системы не превосходила бы заданной величины. Учитывая (12), получим математическую постановку задачи в виде:

$$\omega^* = \min_{c_k} [\bar{R}_s(t_0, t) - R^*], \quad \omega^* \geq 0 \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^n c_k \leq Z^*. \quad (14)$$

Решение задачи планирования ремонтов системы  $S$  будет заключаться в том, чтобы найти такие стоимости ремонтов  $c_k$ , чтобы удовлетворялись соотношения (13), (14). Задача не имеет единственного решения в силу свойств функции  $\varphi$ . Выбор окончательного решения для применения на практике должен осуществлять специалист, руководствуясь дополнительными целесообразностями.

**Выводы.** Формализация задачи планирования оптимальных объемов ремонтов оборудования систем энергоблоков АЭС до уровня математической модели (13), (14) дает возможность перейти к этапу решения задачи и проведению тщательных численных экспериментов на реальных объектах. Только после сравнения численных результатов с опытом ремонтов оборудования энергоблоков можно будет говорить о приемлемости модели для практического применения. Представленная задача многоплановая и содержит много особенностей, которые отразить в одной статье авторам показалось нецелесообразным по разным причинам. Среди проблемных сторон задачи особенно выделим следующие: 1) неединственность модели удельной ВБР системы; 2) изменение моделью (13) традиционного представления о текущем, среднем и капитальном ремонте оборудования из-за того, что искомые затраты  $c_k$  в модели (12) являются любыми числами из интервала  $0 \leq c_k \leq z_k$ ; 3) неединственность разложения предельно-допустимой вероятности радиационной аварии на сумму предельно-допустимых ВБР систем; 4) возможность игнорирования в модели планирования ремонтов критериями выработки электроэнергии и ресурса энергоблока.

**Список литературы:** 1. Каница П.Л. Эксперимент. Теория. Практика. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 496 с., ил. – (Наука. Мировоззрение. Жизнь). 2. *Справочник по ядерной энерготехнологии*: Пер. с англ. / Ф. Ран, А. Адамантиадес, Дж. Кентон, Ч. Браун; Под ред. В.А. Легасова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 752 с. 3. Острейковский В.А. Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций. М.: Энергоатомиздат, 1994, 287 с. 4. Клёмин А.И. Надёжность ядерных энергетических установок. Основы расчёта. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 334 с. 5. Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынин Г.Б. Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 136 с. 6. Андрияшин А.В. Основы создания автоматизированной системы управления ремонтами // Теплоэнергетика. 2001. №10. – С. 53 – 56.

Поступила в редколлегию 25.02.06